

НОВИЙ СПОСІБ ОТРИМАННЯ МІРИ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ

В.М. Учанін¹, С.М. Мінаков²

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

²НТУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», м. Київ

Вимірювання механічних напружень важливе для оцінювання технічного стану і прогнозування довговічності конструкцій. Це особливо важливо для зварних конструкцій через характерні залишкові напруження, викликані усадкою металу і фазовими змінами під час формування зварного шва [1, 2]. Існуючі методи вимірювання напружень в елементах конструкцій можна поділити на руйнівні і неруйнівні методи. До найпопулярніших відносяться механічні методи, побудовані вимірювання деформацій під час відокремлення частки матеріалу конструкції, наприклад метод отвору з тензометричними вимірюваннями поверхневих деформацій. Загалом, крім цього, відомо багато інших фізичних методів, серед яких на практиці найчастіше використовують рентгенівський, ультразвуковий, тензометричний, оптичний (голографічний і метод електронної спекл-інтерферометрії) і магнітні методи, кожен із яких має свої переваги і обмеження [3].

Значного поширення для визначення напруженого стану набули магнітні методи, побудовані на перебудові магнітних доменів під дією зворотного магнітострикційного ефекту (Вілларі ефект) [4-6]. Ці методи, зазвичай, побудовано на залежності різних параметрів петлі гістерезису або шумів Баркгаузена від напружень. Магнітопружний і магнітоанізотропний (МА) способи визначення напруженого стану також використовують зворотний магнітострикційний ефект [6-10]. Останні роки, нами розвивається магнітоанізотропний метод, побудований на визначенні зміни анізотропії магнітних властивостей контрольованого матеріалу під дією механічних напружень [11-14]. В роботах [12-14] ми розглядаємо МА метод варіантом вихрострумowego методу, зважаючи на використання змінного електромагнітного поля, що дозволяє застосувати традиційні підходи, зокрема пов'язані з презентацією сигналу вихрострумowego перетворювача (ВСП). В цих роботах досліджено, зокрема, зміни сигналу спеціалізованого ВСП під дією механічних напружень розтягу і стиску, показано існування магнітно-механічного гістерезису, а також запропоновано нові оригінальні застосування МА методу.

Великою проблемою, що стримує розвиток неруйнівних методів вимірювання механічних напружень, є відсутність стандартних зразків (СЗ), які можна використовувати в якості міри механічних напружень для налаштування відповідних приладів. Без перебільшень можна сказати, що мова йде про створення принципово нової методології метрологічного забезпечення приладів вимірювання механічних напружень. Без цього, ефективне впровадження МА методу для вирішення актуальних задач технічного діагностування відповідальних об'єктів промисловості неможливо. В результаті поставлена задача створити технології виготовлення СЗ, яка могла би забезпечувати:

- виготовлення зразків із матеріалу об'єкту діагностування;
- формування механічних напружень різного знаку (розтягу або стиску) і різної величини;
- можливість вимірювання рівень механічних напружень в зразках прямими методами для їх метрологічного оцінювання і атестації.

Для створення технологій отримання мір механічних напружень запропоновано використати метод моделювання зварювальних процесів нагріванням локальних

ділянок пластин із прорізами до температури переходу матеріалу у пластичний стан [15]. На рис. 1 зображено заготовку для створення міри механічних напружень із листової сталі, де 1 – заготовка довжиною L і шириною B ; 2 – наскрізний проріз; 3 і 4 половини заготовки між прорізом і краєм; 5 – затискачі; 6 – прикладена сила розтягу. Заготовку 1 попередньо відпалюють для надання їй однорідності за структурними і магнітними властивостями, а також зменшення рівня можливих залишкових напружень. Далі за необхідності проводять хіміко-термічну обробку заготовки згідно штатної технології виготовлення контрольованого об’єкту. В середній зоні заготовки виконують наскрізний проріз 2 шириною наприклад 2 мм, який умовно поділяє заготовку на 2 частини (3 і 4 на рис. 1).

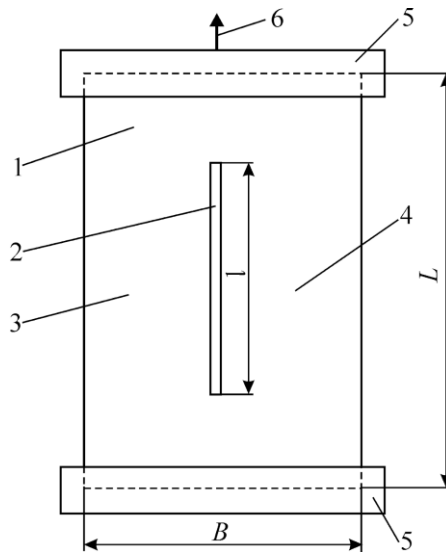


Рис. 1. Заготовка для виготовлення міри механічних напружень

В наведеному прикладі (рис. 1) частини заготовки виконані однаковими. Далі одну частину заготовки (наприклад 3 на рис. 1) між прорізом 2 і краєм заготовки нагрівають до температури переходу матеріалу в пластичний стан. Для сталі така температура складає 600°C . Нагрів частини 3 заготовки 1 із прорізом 2 можна проводити з однієї сторони заготовки за допомогою газового пальника. Можна вважати, що за умови короткого часу нагріву температура іншої частини 4 заготовки залишається незмінною завдячуючи існуванню прорізу 2, який перешкоджає розповсюдженню тепла. Контроль температури нагріву зручно здійснювати за допомогою цифрового пірометра (наприклад Raytec PM Plus). Під час нагріву частини заготовки матеріал в ній не може розширюватись через холодні частини заготовки, які перешкоджають її деформуванню. Для додаткового перешкодження деформуванню заготовки під час місцевого нагріву краї заготовки, що перпендикулярні прорізу, можна закріпити, наприклад, в затискачах 5 машини для механічних випробувань (на рис. 1 показано схематично). Через неможливість деформування в частині, що нагрівається, формуються напруження стиску. Внутрішні зусилля, що з'являються під час нагріву у частині 3 заготовки, будуть формувати у холодній частині 4 заготовки реактивні напруження розтягу. Такі напруження виникають через нерівномірний розподіл температури, якому сприяє наявність наскрізного прорізу 2. Під час охолодження від 600°C (умовна температура переходу в пластичний стан) матеріал в частині 3 заготовки переходить у пружний стан. Вільному укороченню частини 3 заготовки при її подальшому охолодженні перешкоджає частина 4 заготовки, яка не підлягала нагріву. Це призводить до формування в частині 3 заготовки залишкових напружень розтягу, які буду зростати в процесі подальшого охолодження. Під час охолодження будуть змінюватись також напруження в холодній частині 4 заготовки, в якій будуть формуватися залишкові напруження стиску. Процес зміни

механічних напружень σ в різних частинах зразка під час циклу нагрівання-охолодження показано на термомеханічній діаграмі (рис. 2). Тут: $0AB_1DF$ – цикл зміни напружень в правій частині СЗ; $0A'B_1D'F'$ – відповідний цикл для частини 4 СЗ.

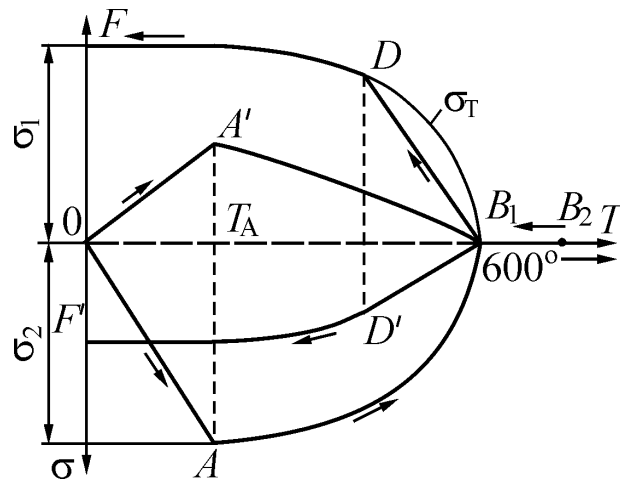


Рис. 2. Термомеханічна діаграма зміни напружень σ під час циклу нагрівання-охолодження.

Залишкові напруження різного знаку, що сформувалися у різних частинах заготовки внаслідок нагріву тільки однієї частини, будуть зберігатися в ній за умови відсутності зовнішніх сил. Схематично розподіл залишкових напружень по ширині зразка подано на рис. 3. Ці залишкові напруження можуть бути зняті тільки або термообробкою або розрізанням заготовки на окремі частини.

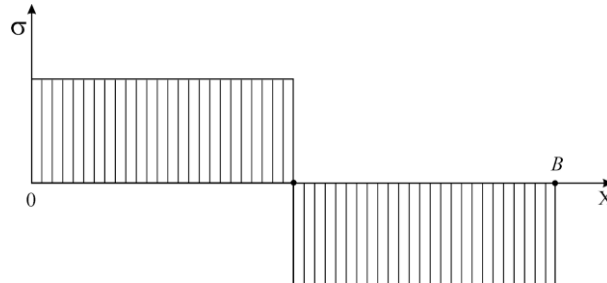


Рис. 3. Спрощена епюра розподілу механічних напружень σ по ширині СЗ.

Для формування залишкових напружень з різними значеннями заготовку з розрізом перед нагріванням до температури переходу матеріалу в пластичний стан попередньо можна розтягнути або стиснути у напрямку вздовж прорізу. Розглянемо випадок, коли до заготовки під час нагріву однієї частини в напрямку вздовж розрізу була прикладена сила P (6 на рис. 1). Під час нагріву попередньо розтягнутої заготовки залишкові напруження у її частинах будуть після охолодження меншими, ніж у заготовки, частина якої були нагріта без попереднього розтягу. І навпаки, при нагріві попередньо стиснутої заготовки залишкові напруження у її частинах будуть більшими, ніж у заготовки, частина якої були нагріта без попереднього стиску.

Локальні механічні напруження в крайніх половинах СЗ можна визначати після нагріву однієї половини до температури переходу матеріалу в пластичний стан і наступного охолодження шляхом вимірювання локальних деформацій матеріалу поверхні зразка методом свердлення отворів. Отримане значення напруження розтягу присвоюють частині СЗ, що підлягала нагріву, а отримане значення напруження стиску присвоюють частині заготовки, що не підлягала нагріву.

Висновок. Поданий спосіб отримання міри механічних напружень дозволяє відтворювати різний рівень механічних залишкових напружень розтягу і стискання в різних частинах СЗ, які можуть бути використані в якості міри механічних напружень для метрологічного забезпечення приладів для вимірювання рівня прикладених і залишкових механічних напружень. Відповідні прилади можуть будуватись на різних фізичних принципах, зокрема для їх створення можна використовувати вихрострумний або магнітний (зокрема, магнітопружний або магнітоанізотропний) методи НК.

1. Nitschke-Pagel T., Wohlfahrt H. *Residual Stresses in Welded Joints – Sources and Consequences* // *Material Science Forum*. – 2002. – Vol. 404-407. – P. 215–226.
2. Винокуров В. А., Григорьянц А. Г. *Теория сварочных деформаций и напряжений*. – М.: Машиностроение, 1984. – 279 с.
3. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. *Method of measuring residual stresses in components* // *Materials and Design*. – 2012. – 35. – P. 572–598.
4. Bulte D.P. Langman R.A. *Origins of magnetomechanical effect* // *Journal of magnetism and magnetic materials*. – 2002. – 251. – P. 229–243.
5. Gur H., Erlan G., Bateglin C. *Investigating the Effect of Subsequent Weld Passes on Surface Residual Stresses in Steel Weldments by Magnetic Barkhausen Noise Technique* // *Materials Evaluation*. – 2016. – № 3. – P. 408–423.
6. Мехонцев Ю.Я. *О магнитных способах оценки внутренних напряжений* // *Дефектоскопия*. – 1966. – № 2. – С. 94–95.
7. Орехов Г.Т. *Определение остаточных сварочных напряжений магнитоупругим методом* / Г.Т. Орехов // *Автомат. сварка*. -1974. -N4. -С.30-32.
8. Abuku S., *Magnetic Studies of Residual Stress in Iron and Steel Induced by Uniaxial Deformation* // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 1977. – Vol. 16. – № 7. – P. 1161–1170.
9. *Noncontact Measurement of Bending Stress Using a Magnetic Anisotropy Sensor* / Yamada H., Uchiyama S., Takeuchi et all. // *IEE Transactions on Magnetics* // 1987. – Vol. Mag-23. – № 5. – P. 2422-2424.
10. Lo C.C.H. *Characterization of Residual Stresses in Ferrous Components by Magnetic Anisotropy Measurements Using a Hall Effect Sensor Array Probe* // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (Ed. D.O. Thompson). – 2011. – Vol. 30. – P. 1249–1255.
11. Пат. 100379 України, МПК G01L1/12, G01N27/72 / Спосіб комплексного електромагнітного контролю структурного і напружено-деформованого стану феромагнітних матеріалів / Учанін В.М., Мінаков С.М., Остап О.П., Безлюдько Г.Я., Мінаков А.С. – Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.
12. Uchanin V., Minakov S., Nardoni G., Ostash O., Bentoglio M. *Eddy current method for evaluation of stresses in steel components* // *Proceeding of 14th Intern. Conf. “Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering”*, September 4-6, 2017, Bernardin, Slovenia. – P. 207-212.
13. Учанін В.М., Мінаков С.М. *Вплив механічних напружень на сигнал вихрострумowego перетворювача магнітної анізотропії* // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2018. – № 1. – С. 21–25.
14. *Nondestructive Determination of Stresses in Steel Components by Eddy Current Method* // V. Uchanin, S. Minakov, G. Nardoni, O. Ostash, S. Fomichov // *Journal of Mechanical Engineering*, 2018 (в друці – www.ojs.sv-jme.eu).
15. Спосіб одержання міри механічних напружень для настроювання приладів технічного діагностування металевих конструкцій / В.М. Учанін, С.М. Мінаков, А.С. Мінаков. Заявка № A2018 07299 від 07.06.18.